



---

# TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

## Instituto Tecnológico de Morelia

División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica

### TESIS

#### “ANÁLISIS DE LA RED ELÉCTRICA ANTE LA PÉRDIDA DE UN AUTOTRANSFORMADOR: CASO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA HERMOSILLO LOMA”

Que para obtener el grado de:

**Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

Presenta:

**Jesús Martín Briceño Zuloaga**

Director de tesis:

**Dr. Enrique Melgoza Vázquez**

Morelia, Michoacán, Junio 2017

# Resumen

En este trabajo de tesis se analiza la problemática que genera la pérdida de un equipo autotransformador, ya sea por falla o mantenimiento, en la red eléctrica de la Zona de Operación Transmisión Hermosillo (ZOTH) perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad, que es una de las tres zonas de operación con las que se coordina la Gerencia de Control Regional Noroeste (GCRNO) para el control físico de la red eléctrica de los estados de Sonora y Sinaloa, México.

El caso de estudio es la desconexión del autotransformador de la subestación eléctrica Hermosillo Loma (HLM), para la demanda máxima de los años 2014, 2015, 2016, 2017 y 2018 y considerando si se cuenta o no con generación hidroeléctrica en la zona. Los resultados indican que ante el disparo del autotransformador mencionado, en demanda máxima, se presenta una sobrecarga en la línea 73000 de un nivel de voltaje de 115 KV que conectan las subestaciones Hermosillo IV (HLC) a Hermosillo VI (HLS), esta sobrecarga, para esta condición de demanda en la zona, puede provocar la pérdida de la confiabilidad y continuidad en el servicio de energía eléctrica de un sector. Los resultados se obtienen con la solución de flujos de potencia utilizando el software PSS®E mediante el análisis de contingencias ( $n - 1$ ).

Se presenta una propuesta de solución ante esta problemática, que es la implementación de un esquema de acción remedial como lo es un disparo automático de carga (DAC) y/o un disparo automático de interruptor (DAI), el cual requeriría desconectar carga y/o seccionar la red de las subestaciones aledañas conectadas a la línea 73000 HLC-HLS para así quitarle la sobrecarga o llevarla a un nivel de transmisión menor que le dé más confiabilidad a la red eléctrica. Si bien la propuesta es la implementación de un esquema de acción remedial, si este no llega a implementarse o fallara, el operador del sistema eléctrico podría realizar estas acciones de manera manual ante la contingencia del disparo del autotransformador de HLM.

# Índice

<b>Dedicatoria</b>	<b>ii</b>
<b>Resumen</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xix</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xxi</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción de problema	1
1.2 Descripción del Área de Control Noroeste (ACNO)	4
1.2.1 Clima de la zona	4
1.2.2 Red eléctrica del ACNO	5
1.3 Objetivo de la tesis	9
1.4 Justificación	9
1.5 Metas	11
1.6 Contenido de la tesis	11
<b>CAPÍTULO 2. EL AUTOTRANSFORMADOR</b>	<b>13</b>
2.1 Teoría del Autotransformador	13
2.1.1 Funcionamiento del autotransformador	13
2.1.2 Tipos de conexiones del autotransformador	16
2.1.3 Aplicaciones del autotransformador	19

2.2 Sobrecarga en transformadores	24
2.2.1 Ciclo de vida del transformador	24
2.2.2 Ciclos de carga definidos	27
2.2.3 Efectos de la sobrecarga	29
2.2.3.1 Efectos de las sobrecargas elevadas de corta duración	29
2.2.3.2 Efectos de las sobrecargas elevadas de larga duración	31
2.2.3.3 Influencia del tamaño del transformador	31
2.2.4 Límites específicos para los grandes transformadores	33
2.2.4.1 Límites de corriente y temperatura	33
2.2.4.2 Accesorios, equipos y otras consideraciones	33
2.2.4.3 Requerimientos de resistencia a cortocircuitos	33
2.2.4.4 Limitaciones de tensión	34
2.3 Protecciones del autotransformador	34
2.4 El autotransformador regulador	41
2.4 Resumen	43
<b>CAPÍTULO 3. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN</b>	<b>44</b>
3.1 Introducción	44
3.1.1 Limitantes en la transmisión de potencia de las líneas eléctricas	45
3.1.1.1 Transformadores de corriente	45
3.1.1.2 Calibre de los conductores	46
3.2 Flujo de potencia en las líneas de transmisión	46

3.3 Acciones para incrementar los límites de transmisión	
en una línea	54
3.3.1 Desconexión automática de carga	55
3.4 Resumen	55
<b>CAPÍTULO 4. EL PSS/E</b>	56
4.1 Introducción	56
4.1.1 Características del PSS/E	57
4.1.2 Capacidades analíticas del PSS/E	58
4.1.2.1 Cortocircuito	58
4.1.2.2 Análisis de contingencia	58
4.1.2.3 Contingencia probabilística	59
4.1.2.4 Simulación dinámica	59
4.1.3 Capacidades de expansión	59
4.1.3.1 Flujo de potencia óptimo (OPF)	59
4.1.3.2 Análisis de estabilidad de pequeña señal (NEVA)	60
4.1.3.3 Modelo constructivo gráfico (GMB)	60
4.2. Ambiente simulador PSS/E v.32	60
4.3 Métodos de solución de flujos	76
4.3.1 Método Newton-Raphson	77
4.3.1.1 Aplicación al cálculo de flujos de potencia	80
4.3.2 Método Newton-Raphson desacoplado (MNRD)	85
4.3.3 Método Newton-Raphson desacoplado rápido (MNRDR)	87
4.4 Resumen	91

<b>CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO</b>	<b>92</b>
5.1 Antecedentes del caso de estudio	92
5.1.1 Estudios previos	92
5.1.2 Demanda de la SACH de los años 2007 a 2015	93
5.1.3 Descripción de la problemática de la red eléctrica de la ZOTH involucrada en los casos de estudio	98
5.2 Caso de estudio "Desconexión del AT1 HLM"	101
5.2.1 Caso 1. Demanda máxima de tarde (Verano 2014)	101
5.2.1.1 Con generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	102
5.2.1.2 Sin generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	105
5.2.2 Caso 2. Demanda máxima de tarde (Verano 2015)	108
5.2.2.1 Con generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	108
5.2.2.2 Sin generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	112
5.2.3 Caso 3. Demanda máxima de tarde (Verano 2016)	115
5.2.3.1 Con generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	115
5.2.3.2 Sin generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	118
5.2.4 Caso 4. Demanda máxima de tarde (Verano 2017)	121
5.2.4.1 Con generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	121
5.2.4.2 Sin generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	124
5.2.5 Caso 5. Demanda máxima de tarde (Verano 2018)	127
5.2.5.1 Con generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	127
5.2.5.2 Sin generación en la planta hidroeléctrica "El Novillo"	130

5.3 Desconexión de líneas 73000 HLC-HLS y 73700 HLC-HLD para el caso de estudio del año 2016	133
5.4 Propuesta de corte de carga ante desconexión AT1 HLM	139
5.4.1 Propuesta de corte de carga ante desconexión del AT1 HLM para la demanda máxima del año 2016	141
5.4.1.1 Desarrollo del Esquema de Acción Remedial (EAR), mediante el <i>Análisis de Sensibilidades</i>	142
5.4.2 Desarrollo de metodología general y particular para resolver la sobrecarga de un equipo de transmisión	156
5.5 Resumen	160
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b>	161
6.1 Conclusiones	161
6.2 Aportaciones	162
6.3 Trabajos futuros	163
<b>REFERENCIAS</b>	164